

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORIA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN
DIRECCIÓN DE PROYECTOS**

**INFORME FINAL DEL PROYECTO
(Aprobado en Consejo de Escuela el 29 de Junio, sesión 11-2007)**

**DESARROLLO Y APLICACIONES DE LAS TECNOLOGÍAS DE PERFILAJE
GAMMA Y RADIORADIOTRAZADORES
CÓDIGO 5402-1490-1201**

**ESCUELA DE CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES
ESCUELA DE CIENCIAS SOCIALES**

INVESTIGADORES

**Dr. Bruno Chinè Polito (bchine@itcr.ac.cr)
Dr. Celso Vargas Elizondo (celvargas@itcr.ac.cr)
Lic. Mario Conejo Solís (mcconejo@itcr.ac.cr)
Msc. Oscar Chaverri Quirós (ochaverri@itcr.ac.cr)**

CARTAGO, 4 DE SEPTIEMBRE DE 2007

Resumen

Desde hace más de veinte años la actual Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales mantiene una importante colaboración del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en el marco de las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear. Gracias a esta colaboración se han venido introduciendo, desde finales de los años noventa, dos tecnologías de un importante impacto en el estudio de los procesos industriales, los radiotrazadores y el escaneo gamma.

Las tecnologías de radiotrazadores y de escaneo gamma representan herramientas muy consolidadas para el estudio, análisis y evaluación de los procesos industriales. Para la aplicación de las mismas no se requiere que la planta o el proceso sean detenidos para evaluar su condición, se trata de tecnologías orientadas a la determinación de la eficiencia y la prevención de fallas y ambas se consideran orientadas a la protección ambiental, pues ayudan a prevenir posibles causas de impacto ambiental.

El grupo de investigadores que participó en el presente proyecto consideró como objetivo fundamental el de fortalecer la capacidad de implementación y de aplicación de las tecnologías de radiotrazadores y perfilaje gamma. El logro de este objetivo permitirá pensar sucesivamente en la transferencia de estas tecnologías a los sectores de interés económico y su uso eficiente en las actividades académicas propias de nuestra universidad. Se seleccionó entonces una metodología de trabajo para la cual el desarrollo de las prácticas y de los procedimientos sería incrementado gradualmente.

Para el desarrollo de las aplicaciones con la técnica de radiotrazadores se realizaron actividades de experimentación en ambientes de laboratorio controlados, en ambientes no controlados pero con pocas variables y en sistemas de mayor complejidad. Para el caso de las aplicaciones del escaneo gamma se llevaron a cabo actividades de experimentación en una torre prototipo, fabricada para estos efectos, en los laboratorios de nuestra Escuela de la y en columnas de la industria petroquímica.

Con base en la experimentación efectuada, principalmente puede concluirse que: Durante las pruebas con radiotrazadores en lagunas de tratamiento de aguas negras, donde se emplea yodo como radiotrazador y hay en dicha laguna una cantidad importante de plantas de lirio acuático, las raíces de dichas plantas poseen un alto poder de absorción del radiotrazador, lo que dificulta la determinación de los tiempos de residencia. La absorción de boro como agente de curado de la madera, es muy variable según sea la sección de la madera expuesta a la solución de curado. La sensibilidad que se obtiene al emplear fuentes de Cesio-137 y un detector de cámara de ionización, es lo suficientemente alta como para permitir detectar la presencia de cuerpos extraños de baja absorción de radiación como vegetación seca (pasto) dentro de columnas de paredes de acero.

Palabras claves

Radiotrazador, scaneo gamma, perfilaje gamma, tecnología nuclear en procesos industriales, actividad específica, isótopos radioactivos, periodo de semidesintegración, sistemas de control nucleónico, galgas nucleónicas y cámaras de ionización.

1. Introducción

Desde 1998 y con un incremento muy significativo a partir del 2001, la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, con la gran colaboración del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), ha venido introduciendo dos tecnologías de un importante impacto en el estudio de los procesos industriales: la Tecnología de Radioradiotrazadores y el scaneo gamma; en casi todos los casos, ambas tecnologías presentan ventajas económicas y ambientales considerables respecto a otras alternativas de estudio, en aquellos casos cuando éstas últimas estén disponibles.

Como indica el OIEA (2000, pp. v) “It is generally accepted that the benefits resulting from radioisotope applications exceed the cost of equipment and studies at least several fold. Based on a retrospective analysis of data, it was found that the average cost-benefit ratio has been about 1:20 in many applications”.

La cooperación del Organismo ha consistido en dos aspectos de vital importancia para nuestra institución: 1) el entrenamiento de personal y 2) la dotación de equipo de última generación en este campo. Ambos aspectos han sido priorizados durante la ejecución del proyecto de cooperación técnica COS/8/009 “Costa Rica industrial improvement by gamma scanning, radiotracers and nucleonic gauges”, ejecutado durante el periodo 2003-2005.

Las dos tecnologías tienen una serie de características que las hacen candidatas únicas para el apropiado estudio o evaluación de procesos. En primer lugar, no se requiere que la planta o el proceso sean detenidos para evaluar su condición y funcionamiento y no se alteran en manera alguna los distintos procesos y componentes que intervienen en la planta bajo evaluación. En segundo lugar, son tecnologías orientadas a la determinación de la eficiencia y la prevención de fallas. De esta manera, en un determinado proceso el personal de la planta puede introducir diferentes mejoras en la eficiencia y éstas pueden ser verificadas mediante estas tecnologías. Finalmente son tecnologías orientadas a la protección ambiental en el sentido de que diagnostican los diferentes procesos o condiciones y dan información valiosa para programar los reemplazos y prevenir posibles impactos ambientales.

Para dar una idea de la utilización de estas tecnologías, se mencionan algunas de sus principales aplicaciones.

El scaneo gamma se utiliza en columnas de destilación industriales (para la determinación las condiciones de funcionamiento de las columnas mismas, deficiencias en los procesos de separación, caída de platos, exceso de espuma, lluvia, inundación, obstrucciones de diverso tipo, sedimentación, entre otros), en columnas de lecho empaquetado (bed packed) para determinar la eficiencia en los procesos de mezclado y la determinación de niveles; también se utiliza en intercambiadores de calor para determinar su integridad, en condensadores, en válvulas, entre otras aplicaciones.

Costa Rica presenta una importante variedad de equipos en los que estas técnicas pueden ser desarrolladas con mucho éxito, tales como tanques, columnas de destilación, sistemas hidráulicos y otros procesos en los que estas tecnologías se utilizan de manera intensiva .

La Tecnología de Radioradiotrazadores, por otro lado, se utiliza en la determinación de fugas, en la determinación de tiempos de residencia de distintos componentes de procesos, en mediciones de flujos, eficiencia de mezclas, en piezas sometidas a procesos de fricción, en el seguimiento de rutas de contaminantes y dispersiones de los mismos, etc. Las empresas que cuentan con mezcladores, con tuberías no superficiales, la industria del cemento, las industrias petroquímicas, la industria de la caña de azúcar y la geotermia están entre los sectores que directamente pueden resultar beneficiados con la utilización de este tipo de tecnología.

Es oportuno recalcar el hecho de que ha sido de mucha utilidad los beneficios de la cooperación por parte del OIEA. Mediante ésta se ha logrado recibir capacitación en las tecnologías indicadas anteriormente, de manera que se cuenta en este momento con un conocimiento básico de ellas. Sin embargo, se enfrentan todavía una serie de limitaciones para poder brindar los servicios a la industria y a otras empresas que lo requieren e introducir esta temática en los cursos formales del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Las limitaciones actuales son las siguientes:

- Se cuenta con un equipo básico, pero no completo, para iniciar los trabajos con estas tecnologías. Por ejemplo, se cuenta con detectores que no cubren el rango de energías con las cuales se trabaja en campo. En muchas aplicaciones se utilizan energías muy bajas, entre 10 y 50 KeV, que no pueden ser detectadas con el equipo disponible. Nuestro compromiso es utilizar isótopos radiactivos de los que se puedan utilizar las mínimas cantidades que sean factibles, efectuando un muy buen balance entre energía, actividad y vida media.
- Las aplicaciones de estas tecnologías, sobre todo los radiotrazadores, requieren que se utilice extensivamente el modelado matemático y las simulaciones como ayuda para normalizar y para experimentar. A pesar de que existe bibliografía al respecto, solamente con la práctica se pueden validar estos resultados.

Se ha recibido entrenamiento en aplicaciones isotópicas, tanto de fuentes cerradas como abiertas, esto ha permitido la oportunidad de conducir nuestras pruebas de manera que se llegue a protocolos que proporcionen la confianza suficiente en su aplicación. Se han hecho importantes esfuerzos para manejar todos los aspectos teóricos involucrados en las tecnologías, pero queda la experiencia práctica y el aprender. Se considera esencial, para

poder dar continuidad al aprendizaje logrado, el tener el espacio para desarrollar habilidades prácticas, de manera que se pueda transferir ésta a empresas del país y de la región centroamericana, así como para la incorporación formal en cursos del ITCR y para otros usuarios. En este sentido, el éxito de la transferencia de este tipo de tecnologías depende sustancialmente de la capacidad desarrollada. No puede darse el lujo de transferir inadecuadamente dicha tecnología, pues el hacerlo así pone en incertidumbre los beneficios que derivan de su utilización en los diferentes procesos industriales.

1.1 Tecnología de Radiotrazadores y Perfilaje Gamma

a) Tecnología de Radiotrazadores

En términos generales, el método de trazadores es una técnica para obtener información de un sistema o parte de este, mediante la observación del comportamiento de una sustancia específica, el trazador, que ha sido agregado al proceso (ARCAL XLIII, 2000). Se marca con el trazador, para hacerla identificable, una fase o una parte determinada del sistema denominada material marcado. El trazador debe comportarse de forma similar al material marcado y tener una propiedad que lo distinga de este, para que sea fácilmente detectable en presencia de otros materiales.

Los radiotrazadores o trazadores radiactivos cumplen muy bien con los requisitos señalados, además su detección a bajas concentraciones es inequívoca. Si se emplean como radiotrazadores isótopos radiactivos de cortos periodos de semidesintegración, se minimizan además los riesgos radiológicos, ya que después de un tiempo corto los niveles de radiación emitidos son sumamente bajos.

b) Perfilaje Gamma

Esta técnica, que utiliza la emisión de rayos por una fuente de radiación sellada de baja actividad y la detección posterior por parte de un detector (sistema fuente-detector), encuentra muchas aplicaciones en la industria (ARCAL XLIII, 2000). En efecto, cuando se interpone un material entre una fuente gamma y un detector, la intensidad del haz de radiación original registrado por el detector resulta disminuido a causa de las diversas interacciones que ocurren entre la radiación y la materia. Esta técnica de diagnóstico nuclear se basa en este principio y consiste en desplazar una fuente y un detector a lo largo de una estructura cerrada que contiene objetos o materiales en su interior. De esta manera se puede registrar una respuesta que representa la cantidad o “contaje” de los rayos gamma que logran atravesar la estructura cerrada y que permite mostrar su contenido en la forma de un perfil de densidades.

1.2 Metodología seleccionada y objetivos

La metodología utilizada es la de trabajar incrementando gradualmente el desarrollo de los procedimientos para las aplicaciones tanto de la Tecnología de Radiotrazadores como de los procesos de Scaneo Gamma. Debido a que se trata de dos tecnologías con características diferentes, la primera utiliza fuentes isotópicas abiertas mientras que la segunda utiliza fuentes selladas, serán separadas desde el punto de vista del procedimiento a seguir.

a) Tecnología de Radiotrazadores

Muchas de las aplicaciones de la tecnología de radiotrazadores involucran, en sentido estricto, consideraciones no lineales. Las heurísticas a utilizar para evitar la no linealidad son dependientes de la aplicación. En este sentido, el dominio de esta tecnología supone un manejo incremental del número de variables involucradas. Las siguientes tres etapas son relevantes para el desarrollo de protocolos para radiotrazadores:

- Experimentación en ambientes controlados. La experimentación con el “flow rig” es el primer paso para lograr estos procedimientos. Durante el segundo semestre el 2005 la Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales ha recibido uno de estos dispositivos para llevar a cabo experimentación. Este sistema permite investigar, en un ambiente controlado, los principales modelos físicos a utilizar en radiotrazadores, como son flujo pistón, mezcladores, series de mezcladores, recirculaciones, etc..
- Experimentación en ambientes no controlados pero con pocas variables, como por ejemplo en el caso de la laguna de oxidación del ITCR. En ambientes como éste se pueden llevar a cabo tanto mediciones de flujo como la determinación de tiempos de residencia. De esta manera, serán experimentos muy importantes para evaluar variables no consideradas en ambientes controlados.
- Experimentación en otros sistemas de mayor complejidad. Se refiere a aplicaciones en las que otro tipo de consideraciones deben ser tomadas en cuenta. Por ejemplo, determinación de tiempos de residencia en reservorios geotérmicos en los que la información geológica desempeña un papel fundamental o en mezcladores y cristalizadores como en el caso de la industria de la caña de azúcar, en las que el conocimiento sobre los procesos y otros datos de ingeniería son relevantes.

b) Perfilaje gamma.

El desarrollo de protocolos para el perfilaje gamma, igualmente, requiere el desarrollar capacidad en el manejo de las variables involucradas. Por ejemplo, la determinación de los problemas de una columna de destilación industrial como caída de platos, espuma, inundación, lluvia, etc. depende mucho del proceso que se lleva cabo. Debido a que el factor de transmisión de cada uno de los materiales es diferente, es de esperar que la atenuación de la radiación difiera dependiendo de cada uno de estos medios, es imprescindible verificar que la actividad de la fuente a emplear, su nivel energético y el tipo de detector a usar sean los adecuados. Es fundamental verificar estos factores, compararlos

y desarrollar modelos interpretativos para ellos. En este sentido, hay dos etapas importantes:

- La experimentación con la torre prototipo o columna construida en nuestra Escuela. De igual manera, es relevante la utilización de fuentes isotópicas estandarizadas. En este sentido, a partir del segundo semestre del 2005 se cuenta con fuentes selladas de Cobalto 60 con actividades de 15, 30 y 48 mCi, para estos propósitos, además de una fuente de Cesio 137 (con una actividad actual de 16 mCi), disponible para estos efectos desde hace varios años atrás
- Experimentación con columnas de la industria petroquímica, como en el caso de RECOPE, de manera que se puedan desarrollar experiencias en forma continua y validar así los resultados y traducirlos en protocolos utilizables en otras columnas.

De acuerdo con lo indicado anteriormente, se determinan cuatro etapas principales del proyecto:

- Desarrollo de protocolos para experimentos con variables controladas como la experimentación con el flow-rig y la torre prototipo o columna construida para propósitos de experimentación; el primero mediante el uso de radiotrazadores y el segundo con perfilaje gamma. Esto con el fin de obtener los siguientes resultados: a) procedimientos para la medición de flujos con diferentes elementos, como recirculación, obstrucciones, dilución continua (Apéndice I); b) procedimientos iniciales para la determinación de tiempos de residencia (Apéndice II); c) conjunto base de procedimientos para perfilaje gamma aplicados a diferentes casos del malfuncionamiento de columnas y torres industriales (Apéndice III); d) resultados experimentales obtenidos; e) desarrollo de modelos matemáticos para flujos pistón y determinación de tiempos de residencia y procedimientos de normalización de resultados.
- Desarrollo de procedimientos para perfilaje gamma y radiotrazadores para aplicar en investigaciones de campo. En particular, en el caso de perfilaje gamma aplicándolos a columnas pequeñas mientras que en el caso de radiotrazadores aplicándolos a lagunas de oxidación. Todo esto con el fin de obtener los siguientes resultados: a) procedimientos con mayor complejidad que los desarrollados en la etapa 1.; b) resultados a utilizar para iniciar el plan de divulgación de estas tecnologías; c) resultados de utilidad para las instituciones involucradas (ITCR, RECOPE); d) refinamiento de modelos teóricos para la interpretación de los resultados.
- Desarrollo de procedimientos para perfilaje gamma y radiotrazadores en aplicaciones de mayor complejidad, como en columnas de diámetros grandes y aplicaciones con radiotrazadores en los que es fundamental la incorporación de información que proviene del sistema mismo, como en el caso de reservorios geotérmicos y en procesos de cristalización de la caña de azúcar. El fin es de obtener procedimientos bastante complejos, así como heurísticas para obtener información, modelos teóricos para la interpretación de los resultados obtenidos y procedimientos de normalización.

- Elaboración del plan de divulgación y de transferencia de conocimientos obtenidos de las experiencias anteriores, orientados a usuarios finales de la industria, empresas del estado y otros sectores de interés económico.

Para poder llevar a cabo el proyecto es vital poder contar con las fuentes abiertas y las selladas que estos procesos de experimentación requieren.

1.3 Objetivos

a) Objetivo general

- Consolidar nuestra capacidad de implementación y de aplicaciones de las tecnologías de radiotrazadores y perfilaje gamma para su transferencia a los sectores de interés económico.

b) Objetivos específicos

- Desarrollo de protocolos o procedimientos estandarizados para la aplicación de radiotrazadores y perfilaje gamma.
- Introducir estas tecnologías en cursos de la carrera de Ciencia e Ingeniería de Materiales y Seguridad Laboral.
- Construir modelos teóricos para la interpretación y análisis de los datos en los dos grupos de tecnologías.
- Establecer y consolidar un mecanismo rápido para la adquisición de isótopos a utilizar en las aplicaciones de radiotrazadores.
- Mejorar los procedimientos de captura y codificación de datos, sobre todo en lo relacionado con el perfilaje gamma.

2. MATERIALES Y METODOS

Los métodos de trabajo se desarrollaron con base en los procedimientos que se aportan en los apéndices del I y II.

En lo relativo a Materiales, se contó con lo siguiente:

- 3 fuentes de Cobalto-60 de 15, 30 y 48 mCi respectivamente
- 1 fuente de Cesio-137 de 16 mCi.
- Tecnesio-99, con la actividad requerida (aportado por el Hospital CIMA)
- Yodo-131, con la actividad requerida (aportado por el Hospital San Juan de Dios)
- Unidad de registro para procesos de “conteo” del nivel de radiación para procesos de scaneo gamma.
- Sistema completo para montaje de sistema de monitoreo para evaluación con radiotrazadores, que cuenta con 6 detectores.
- Aditamentos completos para montaje y operación del sistema fuente-detector, para los procesos de scaneo gamma.
- Sistema de computo para adquisición y tratamiento de la información

3. PRINCIPALES EXPERIMENTOS REALIZADOS

3.1 Determinación del Tiempo de Residencia (DTR) en planta o laguna de tratamiento de aguas negras del ITCR

Aspectos generales

Una de las características que presenta la tecnología de trazadores es que cada una de las aplicaciones es, en un sentido importante, única. Pequeñas variaciones en las características del experimento introducen cambios en cualquiera de los resultados obtenidos con anterioridad. En este sentido, se requiere adaptar los diseños a las circunstancias específicas de cada prueba o experimento que se desee realizar.

Por ello, se requiere realizar un cuidadoso análisis del caso o situación, tomar en consideración, hasta donde sea posible, todos los detalles involucrados. En ocasiones, como se indicará más adelante, la carencia de información sobre el comportamiento de determinados elementos puede variar sustantivamente cualquier resultado. Pero no solo la situación puede introducir variaciones, sino también el tipo de trazador utilizado; los detectores, el tipo de geometría, la concentración del detector a utilizar, el grado de adherencia a las paredes de su contenedor, el sistema de inyección del radiotrazador, elementos que puedan causar interferencias y el sistema de detección, resultan fundamentales.

El desarrollo de experticia en el campo debe comenzar por manejar aquellos elementos que son comunes a todo experimento con radiotrazadores, de manera que se reduzcan las

incertidumbres con las que es muy frecuente encontrar. Dentro de estos elementos están los siguientes:

1. Arreglos geométricos
2. Corrección por decaimiento radiactivo
3. Factor de calibración
4. Estimación de la cantidad de radiotrazador requerido en un experimento
5. Sistemas de medición

Una parte importante del trabajo durante el año consistió en alcanzar un nivel de dominio en estos factores. Para ello se realizaron varias pruebas. Muchos de estos factores son condición para los otros o están involucrados en la definición de estos.

- **Arreglos geométricos.** O simplemente geometría, consiste en el establecimiento del arreglo conformado por el sistema a evaluar- cantidad de trazador-sistema de detección que permita garantizar la confiabilidad de los resultados. Aquí es importante conocer las características del sistema a evaluar: tubería, laguna, etc. A partir del análisis del sistema se determina el lugar en el que se ubicarán los detectores. Para esto es importante construir los soportes físicos y otras condiciones necesarias para garantizar que el análisis de los datos se realiza sin introducir ninguna alternación en el sistema. Cuando sea posible es mejor realizar el análisis de los datos en el laboratorio donde las condiciones de experimentación pueden garantizarse. Cuando se realiza en el sitio, es fundamental mantener consistencia en todo momento. De igual manera, la utilización de sistema de colimación para reducir cualquier tipo de interferencia es importante siempre que sea posible. De otro modo, debe garantizarse que no hay una interferencia significativa en el experimento de manera que invalide los datos. Fueron realizados varios experimentos tanto en el flow-rig como en laboratorio para dominar diversos tipos de geometrías y como se afectan los datos al modificar algunas variables. En algunas de estas pruebas se pudo determinar la influencia de una insuficiente colimación, lo cual no alteró significativamente los resultados, cuando se determinaron las cantidades de radiación que pasó por tuberías en dos puntos diferentes, separados por una distancia de 1,5 metros uno del otro. Otro fenómeno encontrado fue la adherencia de material radiactivo en las tuberías de plástico o en otros contenedores plásticos o de vidrio que fueron utilizados en los ensayos. En este sentido, es fundamental garantizar que la adherencia no altere los resultados. Cuando se estén realizando experimentos en los que intervienen este tipo de instrumentos, por ejemplo, en geometrías para análisis de datos por muestreo, es importante contar con bastantes juegos de recipientes diferenciados para la dilución del material radiactivo y para la toma de muestras. Es recomendable lavar los recipientes después de cada muestra y efectuar las mediciones correspondientes de manera que el proceso de lavado se efectúe hasta eliminar las adherencias en los recipientes que se hayan presentado. Finalmente, en una de las experiencias realizadas, mediante las lecturas de radiación de fondo con el contenedor utilizado para obtener el factor de geometría del sistema y que luego se empleó para transportarlas muestras, se encontró que se había adherido una cantidad importante de material radiactivo. Al principio no se encontró una explicación satisfactoria para este fenómeno, luego sí fue posible (al cabo de diversas pruebas) establecer lo que había pasado. De esta manera, es recomendable utilizar agua o

cualquier otro líquido, compatible con la experiencia a realizar, que ayude a desprender el material adherido. Por ejemplo, cuando se trata de experimentos con agua, el contenedor debe romperse, sumergirse en el agua y agitarse durante algunos minutos para garantizar que no queda material adherido a las paredes del contenedor. Esto es recomendable para experimentos en los que están involucrados tiempos relativamente largos: horas o días. Para experimentos de corta duración, lo recomendable es diluir el material en una cantidad de líquido mayor, por ejemplo, un litro, justo antes del experimento, de manera que se remueva todo el material radiactivo. Es importante la utilización de detectores de alta sensibilidad para corroborar que no permanece el material adherido en las paredes. Se realizaron un total de 9 experiencias relacionadas con las definiciones de geometrías y factores relacionados: 3 mediciones de flujo en el flow-rig, 2 en una laguna de oxidación.

- **Corrección del decaimiento radiactivo.** El decaimiento radiactivo es la propiedad que poseen los isótopos radiactivos de transformarse en otros isótopos, estables o no, en un tiempo específico. Este tiempo específico es conocido como “periodo de semidesintegración”. Es importante realizar la corrección del decaimiento de manera que se garantice la consistencia de los resultados, principalmente cuando se está trabajando con radioisótopos con “vida media muy corta”. Para llevar a cabo esta corrección es importante conocer el periodo de semidesintegración del isótopo en cuestión, así como el cálculo de la actividad inicial y la actividad al momento de su aplicación. Esto se estima teóricamente con la información relativa al radioisótopo. Se realizaron dos pruebas de corrección del decaimiento radiactivo. El resultado de esta experiencia se adjunta en el anexo IV
- **Factor de calibración.** El factor de calibración consiste en el establecimiento de la eficiencia del detector o respuesta del detector ante una determinada cantidad conocida de radiación. La determinación del factor de calibración debe tomar en consideración, la geometría a utilizar en el experimento, la energía del trazador y el rango de energías que es capaz de registrar el detector y en qué cantidad (eficiencia intrínseca del detector). Se realizaron varias pruebas orientadas a obtener factores de calibración. En algunas de estas pruebas se utilizaron detectores con capacidad limitada, que fueran sensibles para energías por debajo de los 60 KeV. Considerando los factores de atenuación se obtuvo un factor de calibración no confiable para la experiencia que se quería realizar. Los resultados anteriores estuvieron directamente relacionados con el tipo de isótopo utilizado (I-125) con energías útiles de alrededor de los 60 KeV. Esto obligó a buscar otro isótopo que se pudiera utilizar y que además fuera compatible con el tipo de detectores que posee la Escuela.
- **Determinación de la cantidad de radioisótopo a utilizar.** La determinación de la cantidad de radiotrazador requerido para llevar a cabo con éxito un experimento depende de varios factores. En primer lugar, de una adecuada medición de la radiación de fondo (radiación natural-radiación cósmica). En segundo lugar, con la eficiencia intrínseca del detector. En tercer lugar, dado que todos estos fenómenos son probabilísticos, es fundamental tomar en consideración la desviación estándar, usualmente fijada en un 2 %. La unidad es el número de cuentas por minuto. En

general, la cantidad mínima detectable se establece, para una geometría determinada, dividiendo las cuentas netas determinadas entre el tiempo total de contero y sumando la relación entre las cuentas por minuto del fondo, entre el tiempo de conteo. Para llevar a cabo esta medición se determinó una geometría y se diluyó una cantidad pequeña pero conocida de material radiactivo, se estimaron las cuentas netas y después se proyectó la cantidad de material radiactivo requerido en la evaluación del sistema real. Es importante utilizar siempre un poco más de material radiactivo en el sistema real, para mejorar la confiabilidad de los datos, es una especie de factor de seguridad. Los datos obtenidos en la determinación de la cantidad de radioisótopo a utilizar se emplea como método de control para estimar cualquier desviación de los datos obtenidos. Para el mejoramiento de la técnica para llevar a cabo esta determinación, se requirió de un proceso de experimentación bastante amplio. Se realizaron varias mediciones y cálculos con el propósito de estimar el factor de calibración para diversas geometrías. Todo este conocimiento fue utilizado en la evaluación de la eficiencia de una laguna de oxidación, la cual se enlista en el anexo V.

- **Sistemas de medición.** Por sistema de detección se entiende la selección, según el experimento a realizar, de la forma en la que se medirá el comportamiento del sistema. Hay varias opciones, está la técnica de medición por muestras, esto consiste en la toma de muestras durante intervalos de tiempo definidos (según características del sistema). Por otro lado, está la técnica de medición continua. En este caso, se mantienen los detectores registrando hasta que se alcance la seguridad de que el sistema ha alcanzado la condición que se desea determinar. Por ejemplo, en aquellos casos en los que se desea medir la eficiencia de la mezcla, deben hacerse medidas hasta que se observe que se pierde la eficiencia de la mezcla. A partir de aquí, para seguir con el ejemplo, se determina dónde se encuentra el óptimo de dicha mezcla.

Para la laguna de oxidación del ITCR, se decidió originalmente emplear el sistema de medición continua, para este caso se vertió una cantidad de 3 mCi de I-131 como radiotrazador en el flujo de entrada “del agua a tratar” al sistema. Se tuvieron dos problemas principales: a) Una cantidad alta del radiotrazador quedó adherida en el recipiente donde se trajo dicho producto y no se contaba con instrumentos apropiados para poder estimar la actividad que se vertió a la laguna y cuanto quedó adherido al recipiente; sí se podía saber que era una cantidad alta se había adherido, debido a que en el recipiente sin la solución que contenía el radiotrazador, la emisión de radioactividad que se podía medir con los equipos de detección con que contamos era bastante importante; además, al introducir detectores de radiación en diversos puntos de la laguna, no se pudo determinar ningún punto donde hubiera algún nivel de radioactividad superior a la radiación natural o de fondo. b) Se hacía necesario dejar el sistema de registro, los detectores y una computadora portátil en el campo, por espacio de varios días, dadas las condiciones del lugar se optó por continuar con el estudio de esta laguna utilizando el método de medición por toma de muestras.

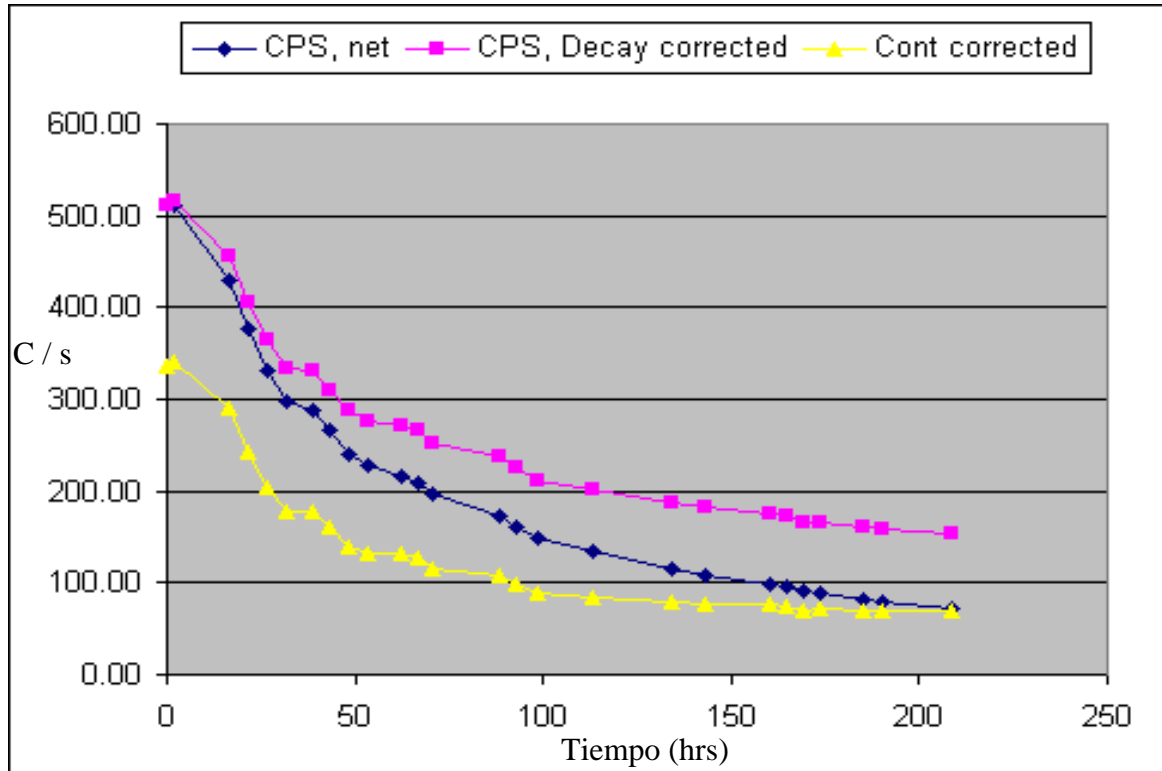
Para realizar este experimento, utilizando el sistema de toma de muestras, se realizaron los siguientes cálculos y se obtuvieron los siguientes datos:

| Calculo de actividad para una laguna de 220 metros cúbicos de capacidad para una descarga de 60 metros cúbicos diarios | | |
|---|--------------------|--|
| Tamaño de la laguna | 220 metros cúbicos | |
| Descarga diaria | 60 metros cúbicos | |
| Total litros diarios | 60,000.00 | |
| Actividad | 60MicroCi | |
| | 2,590,000.00 | |
| útil 89 % | 2,305,100.00 | |
| Al cabo de 4 días | 1,728,825.00 | |
| Libros por segundo | 6.94 | |
| Cuentas por litro | 28.81 | |
| Cuentas por segundo | 200.10 | |
| dilución en laguna (c/s) | 72.76 | |



| Decay/data | | 0.693147181 | | | | |
|------------------|-----------|-------------|--------|----------|----------------------|--|
| Time 20/06/06 | | | | | | |
| Initial ac mCi | 5.11 | | | | | |
| half/life /s | 193.2 | | | | | |
| | | | | | | |
| ti trascurrido/s | C totales | c/s | Time | CPS, net | CPS, Decay corrected | |
| 0 | 2384384 | 662.33 | 0 | 512.33 | 512 | |
| 2.00 | 2,384,384 | 662.33 | 2.00 | 512.33 | 516 | |
| 16.50 | 2,084,294 | 578.97 | 16.50 | 428.97 | 455 | |
| 21.50 | 1,892,418 | 525.67 | 21.50 | 375.67 | 406 | |
| 26.50 | 1,732,606 | 481.28 | 26.50 | 331.28 | 364 | |
| 31.50 | 1,612,881 | 448.02 | 31.50 | 298.02 | 334 | |
| 38.50 | 1,577,822 | 438.28 | 38.50 | 288.28 | 331 | |
| 43.50 | 1,496,980 | 415.83 | 43.50 | 265.83 | 311 | |
| 48.50 | 1,407,995 | 391.11 | 48.50 | 241.11 | 287 | |
| 53.50 | 1,360,332 | 377.87 | 53.50 | 227.87 | 276 | |
| 62.50 | 1,320,451 | 366.79 | 62.50 | 216.79 | 271 | |
| 66.50 | 1,292,335 | 358.98 | 66.50 | 208.98 | 265 | |
| 70.50 | 1,246,780 | 346.33 | 70.50 | 196.33 | 253 | |
| 88.50 | 1,160,720 | 322.42 | 88.50 | 172.42 | 237 | |
| 93.00 | 1,120,802 | 311.33 | 93.00 | 161.33 | 225 | |
| 98.50 | 1,074,515 | 298.48 | 98.50 | 148.48 | 211 | |
| 113.50 | 1,022,114 | 283.92 | 113.50 | 133.92 | 201 | |
| 134.50 | 958,166 | 266.16 | 134.50 | 116.16 | 188 | |
| 143.00 | 932,432 | 259.01 | 143.00 | 109.01 | 182 | |
| 160.00 | 896,101 | 248.92 | 160.00 | 98.92 | 176 | |
| 164.50 | 883,664 | 245.46 | 164.50 | 95.46 | 172 | |
| 169.00 | 937,805 | 240.50 | 169.00 | 90.50 | 166 | |
| 173.65 | 932,809 | 239.11 | 173.65 | 89.11 | 166 | |
| 185.00 | 908,555 | 232.38 | 185.00 | 82.38 | 160 | |
| 190.50 | 901,322 | 230.37 | 190.50 | 80.37 | 159 | |
| 208.50 | 873,755 | 222.71 | 208.50 | 72.71 | 154 | |

Gráfico 1. Curva de decaimiento radiactivo vs tiempo



PRUEBA PARA LA DETERMINACION DEL FACTOR DE CALIBRACION
USO DEL FLOW RIG: GEOMETRÍA DETECTOR EN CONTACTO
CON EL TUBO, BLINDADO CON PLOMO DE 1 cm

| Datos iniciales | | Tiempo | Vida media | decaimiento |
|---------------------|------------|--------|------------|-------------|
| Isótopo | Tc-99m | | 368 | |
| actividad I | 4 mCi | | | |
| hora de obtención | 10:45 a.m. | | | |
| Hora primera prueba | 01:31 | 166 | 45.11 | 2.93 |
| Hora segunda prueba | 02:13 | 208 | 56.52 | 2.70 |
| Dilución | 2 L | | | |
| Cantidad por prueba | 1 L | | | |

Prueba 1

| Fondo | | CPS |
|------------|---------|-------|
| Detector 1 | 66,608 | 37.00 |
| Detector 2 | 101,036 | 56.13 |

| | | |
|-------------|------------|------------|
| Prueba | | |
| Detecrtor 1 | 10,936,470 | 10,869,862 |
| Detecrtor 2 | 9,366,622 | 9,265,586 |

Nuevo fondo

| | | |
|-------------|------------|--------|
| Detecrtor 1 | 385,200 | 642 |
| Detecrtor 2 | 12,834,000 | 21,390 |

Prueba segunda

| | |
|-------------|-----------|
| Detecrtor 1 | 4,285,975 |
| Detecrtor 2 | 3,937,954 |

Nuevo fondo

| | | |
|-------------|---------|-----|
| Detecrtor 1 | 83,372 | 139 |
| Detecrtor 2 | 246,664 | 411 |

Dado que no se había podido observar “el pico de salida” o el incremento de la radiación de fondo a la salida de la laguna, se formularon diversas hipótesis, que al evaluarlas no dieron resultados satisfactorios, lo último que se valoró fue la posible interferencia que las plantas de lirio acuático podrían estar produciendo.

Para valorar lo anterior se tomó una muestra de lirio que estaba en la “laguna previa” a la que estaba siendo evaluada y donde no se había vertido radiotrazador, se llevó al laboratorio y se procedió a realizar el “contaje” por un tiempo 30 minutos. Se efectuó lo mismo con una muestra idéntica de lirio extraída de la laguna sujeta a evaluación y se logró constatar que hubo un aumento significativo de las “cuentas” a nivel a radioactividad. Lo que demostró que mientras se tuviera la presencia de lirio acuático en esta laguna, no sería posible realizar una determinación de tiempos de residencia en ella.

3.2 Evaluación de procesos de difusión de boro, como agente de curado, en los procesos de preservación de la madera

Procedimiento empleado

El sistema de difusión al vacío tiene una capacidad para 20 litros de solución. Sobre esta base se estimó la cantidad de material radiactivo a utilizar de manera que la detección fuera la correcta. Considerando el corto periodo de decaimiento radiactivo, se utilizaron 380 μ Ci de Tc-99m (donados por un hospital nacional). La siguiente tabla indica los valores iniciales estimados al momento de realizar el experimento.

| Cantidades | Cálculo inicial de la actividad | |
|------------|---------------------------------|-------------------|
| | | |
| Solución | 20 litros | 20,000 mililitros |
| Tc-99m | 380microCi | 14,060,000 C/S |
| Dilución | cuentas p x ml | 703 C/S por ml |

Se trabajó con una pieza de madera de laurel donde se diferenciaban claramente la parte correspondiente a albura, duramen y la médula. Las dimensiones de la pieza fueron las siguientes: 7,5 cm X 7,5 cm de sección transversal y 40 cm de longitud. La prueba buscaba determinar los porcentajes de absorción para cada uno de los componentes de la pieza.

La pieza fue sometida al siguiente proceso: 1) se pesó la pieza al inicio de la prueba. 2) se extrajo el aire durante una hora; 3) Se preparó la solución para tratar la madera y se le adicionó el material radiactivo en las cantidades indicadas. 4) se inyectó la solución al sistema de difusión durante una hora tiempo estimado como suficiente para llegar a la saturación. 5) se secó la pieza hasta que secara completamente. 6) Se procedió a pesarla de nuevo para determinar la cantidad de boro absorbida. 7) Se seccionó la pieza en dos partes iguales. Una pieza fue utilizada para validar los resultados obtenidos pero utilizando los métodos convencionales por colorimetría. La otra pieza fue utilizada para determinar la cantidad de radiación presente en la pieza. Se seccionó esta pieza en cuatro partes de 10 cm cada una, y éstas en tres segmentos iguales de manera que predominara al albura o el duramen o la médula según el caso.

Se procedió a evaluar las piezas; un total de doce trozos de la pieza, con lo que se obtuvo los siguientes resultados:

Los resultados obtenidos mostraron que había una cantidad mayor de cuentas por segundo, y consecuentemente mayor cantidad de boro, en aquellos segmentos en los que predominaba la albura. Esto mismo se encontró en las piezas en los que predominaba la médula. Consecuentemente, los porcentajes menores correspondieron al duramen.

El sistema de conteo se realizó, para cada una de las piezas, por periodos cortos de aproximadamente un minuto cada uno. Se tomaron los datos correspondientes a cuentas por minuto al momento en que el detector se estabilizaba en su lectura.

Sin embargo, para garantizar una mayor confiabilidad en los datos es necesario adoptar las siguientes acciones.

- 1) Colimar el detector de manera que se reduzca la influencia de la radiación adyacente.
- 2) No secar la pieza sino hasta después de realizada la medición a fin de evitar posible evaporación del material radiactivo durante el proceso de secado.
- 3) Utilizar otra geometría para la evaluación de manera que ésta sea más continua y no discontinua como en ese experimento realizado. Esto último debido al proceso de seccionalización de la pieza.
- 4) Utilizar periodos de tiempo mucho más largos en la evaluación de los segmentos a fin de evitar errores en la medición. Para estos casos es recomendable realizar el conteo por periodos mayores o iguales a cinco minutos

Debido a factores lejos de nuestro alcance, principalmente, debido a una falla en el sistema de difusión, no pudimos avanzar en estos ensayos. Una vez que se resuelva el problema, estaremos incluyéndolos en los ensayos programados para eventos futuros.

3.3 Realización de un perfil por scaneo gamma de la torre de pruebas de la Escuela

Este trabajo fue desarrollo con la gran colaboración de estudiantes de la Carrera de Ingeniería en Materiales. La torre didáctica se dividió en intervalos de 5 cm y la numeración se realizó de abajo hacia a arriba como se muestra en la siguiente figura.

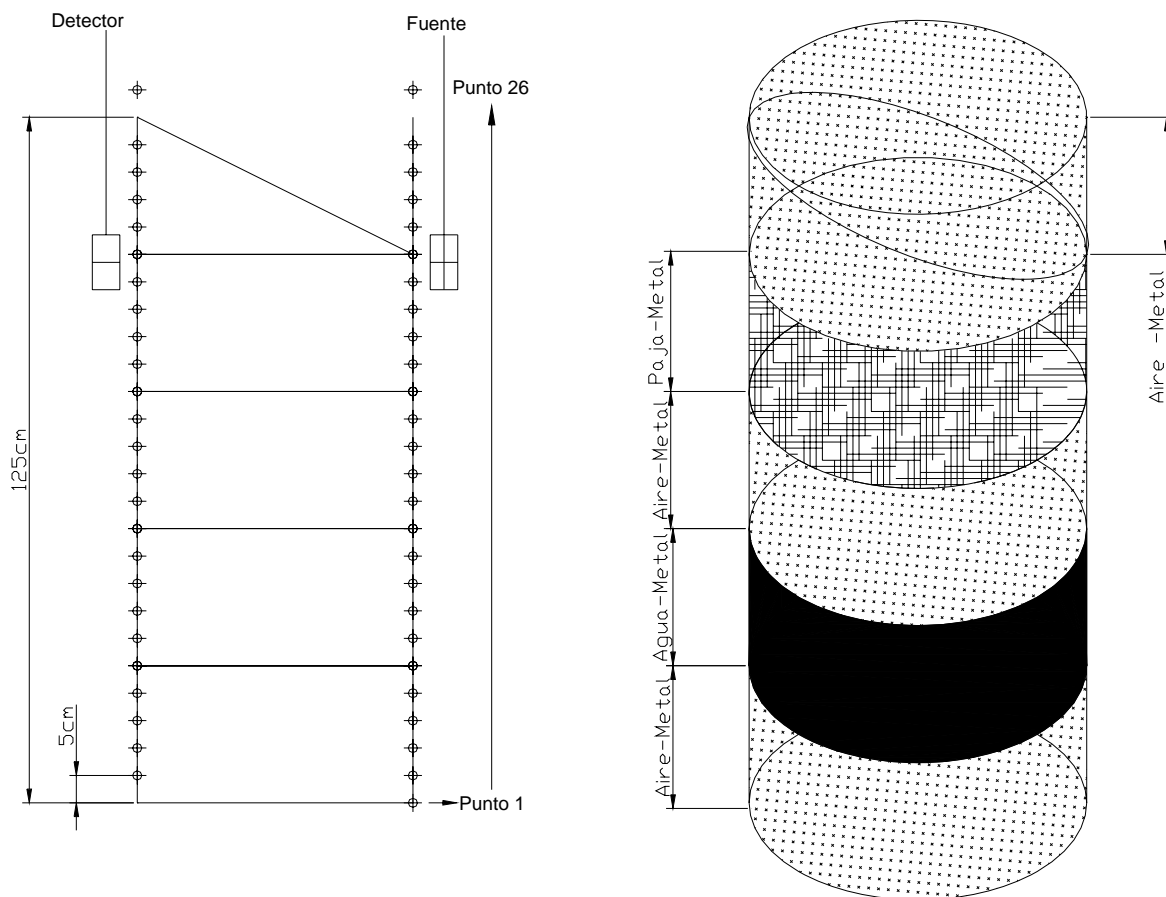


Figura N°1 Torre, arreglo de platos y puntos de medición

El perfilaje, se realizó mediante una fuente sellada de Cs 137 debidamente blindada y colimada, la cual tenía una actividad de 16 mCi

Luego de la preparación del equipo y antes de la ejecución propiamente del ensayo, se realizó la mediación de la radiación de fondo, obteniéndose un valor de 150 c/s (cuentas en cada segundo) la cual se restó de las cuentas totales registradas por el contador. En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos, donde “i” es el número de medición, “h” es la altura en cm (desde la base hacia la parte superior donde se ubica la medida) la cuentas (c/s) es la lectura brindada por el contador y cuentas corregidas es el número de cuentas menos la radiación de fondo.

Tabla N°1 Altura de cada medición y número de cuentas obtenidas y su corrección.

| Medición N° | h (cm) | Cuentas (kc/s) | Cuentas corregidas (kc/s) |
|-------------|--------|----------------|---------------------------|
| 1 | 0 | 33,10 | 32,95 |
| 2 | 5 | 33,10 | 32,95 |
| 3 | 10 | 32,90 | 32,75 |
| 4 | 15 | 32,90 | 32,75 |
| 5 | 20 | 32,80 | 32,65 |
| 6 | 25 | 22,90 | 22,75 |
| 7 | 30 | 16,30 | 16,15 |
| 8 | 35 | 16,40 | 16,25 |
| 9 | 40 | 16,40 | 16,25 |
| 10 | 45 | 17,00 | 16,85 |
| 11 | 50 | 32,10 | 31,95 |
| 12 | 55 | 32,60 | 32,45 |
| 13 | 60 | 32,80 | 32,65 |
| 14 | 65 | 32,80 | 32,65 |
| 15 | 70 | 32,80 | 32,65 |
| 16 | 75 | 24,70 | 24,55 |
| 17 | 80 | 30,50 | 30,35 |
| 18 | 85 | 30,30 | 30,15 |
| 19 | 90 | 30,50 | 30,35 |
| 20 | 95 | 30,20 | 30,05 |
| 21 | 100 | 29,50 | 29,35 |
| 22 | 105 | 31,00 | 30,85 |
| 23 | 110 | 31,00 | 30,85 |
| 24 | 115 | 31,30 | 31,15 |
| 25 | 120 | 30,40 | 30,25 |
| 26 | 130 | 36,40 | 36,25 |

La existencia de problemas que afecten el correcto funcionamiento de una torre se traduce en diversas alteraciones en el perfil de densidad. Las causas de mal funcionamiento de una torre que pueden ser identificadas a través del análisis de un perfil gamma como se indica a continuación.

El perfil de densidades obtenido durante el ensayo se presenta en la siguiente figura.

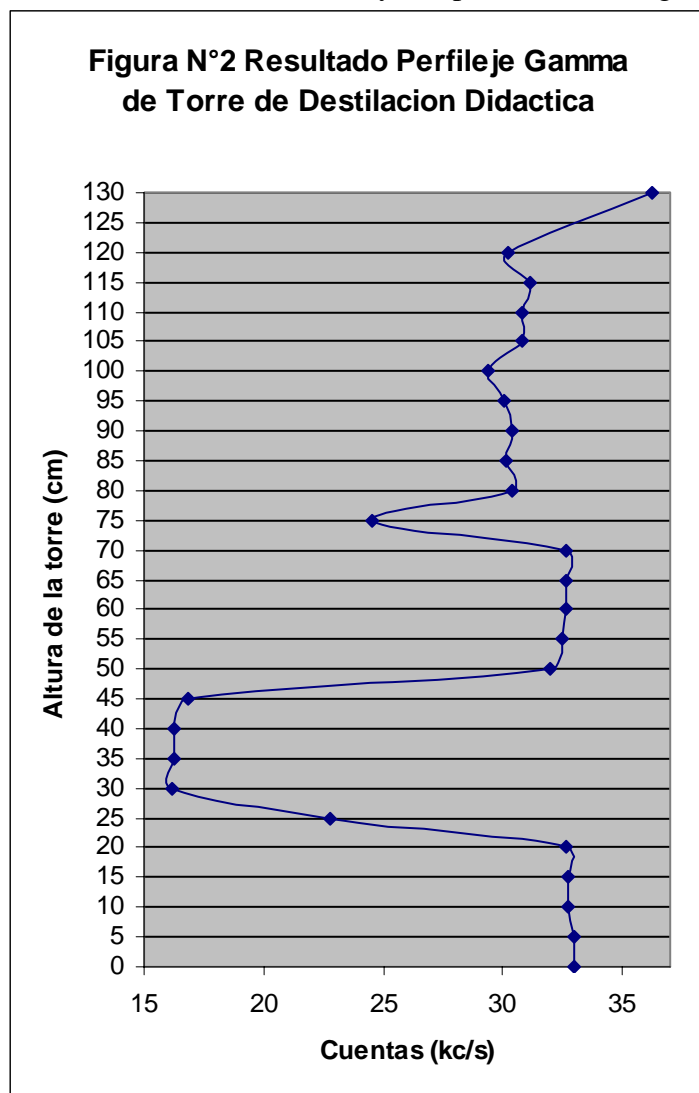


Figura N°2 Perfil de densidades para la torre didáctica.

Como se muestra en la figura N°2, la primera medición se realizó en el extremo inferior y la última, a 5 cm fuera del límite superior de la torre.

Como se observa en la Tabla N°1, así como en la Figura N°2, el número de cuentas detectadas para la zona donde el plato se ubica correctamente, pero el nivel se encuentra vacío, la lectura es aproximadamente 32.81kc/s y se muestra como una línea parcialmente vertical en el extremo de la fuente en el perfil, este tipo de patrón obedece normalmente a un plato faltante, el segundo nivel, el cual para efectos de la práctica se llenó con agua, presenta el perfil opuesto al del primer nivel, i.e. un perfil de tendencia vertical al lado del detector, lo que significa que se está en presencia de un nivel inundado; el número de

cuentas promedio para este nivel es de 17.65kc/s siendo el valor más bajo en toda la práctica. El tercer nivel presenta un perfil prácticamente idéntico al obtenido para el nivel 1 aproximado a 32.47kc/s lo que indica que también hay ausencia de material en dicho nivel. Para el nivel cuarto se utilizó una especie de paja pero como no estaba compactada, de manera tal que formara un sólido continuo, las cuentas detectadas fueron ligeramente inferiores a las de un nivel vacío, aproximadamente 29.09kc/s.

Para el quinto nivel se colocó el plato inclinado como se muestra en la figura N°2, las cuentas captadas bajaron con respecto a los niveles donde solo se tenía la presencia de aire y fueron ligeramente mayores a las del nivel con paja. Debido a la disminución de la intensidad captada, ocasionada por el espesor de metal adicional en la sección transversal atravesada por la emisión, este perfil también podría indicar un plato faltante o un plato colapsado en el perfilaje de una torre real. La última lectura se realizó sobre el límite superior de la torre, lo que corresponde a la lectura mayor captada (36.25kc/s) esto debido a que no hay material relevante interpuesto entre la fuente y el detector.

3.4 Pruebas con Radiotrazadores

Este ensayo también fue desarrollado con una participación muy destacada de los varios estudiantes de la carrera de Ingeniería en Materiales.

Especificaciones de la configuración de los equipos y procedimientos empleados:

Distancia entre los dos detectores utilizados: un metro.

Hora de calibre: 9:30 a.m.

Hora de inyección: 11:53 a.m.

Actividad total: 1.95 mCi

Elemento radiactivo: Tecnecio 99.

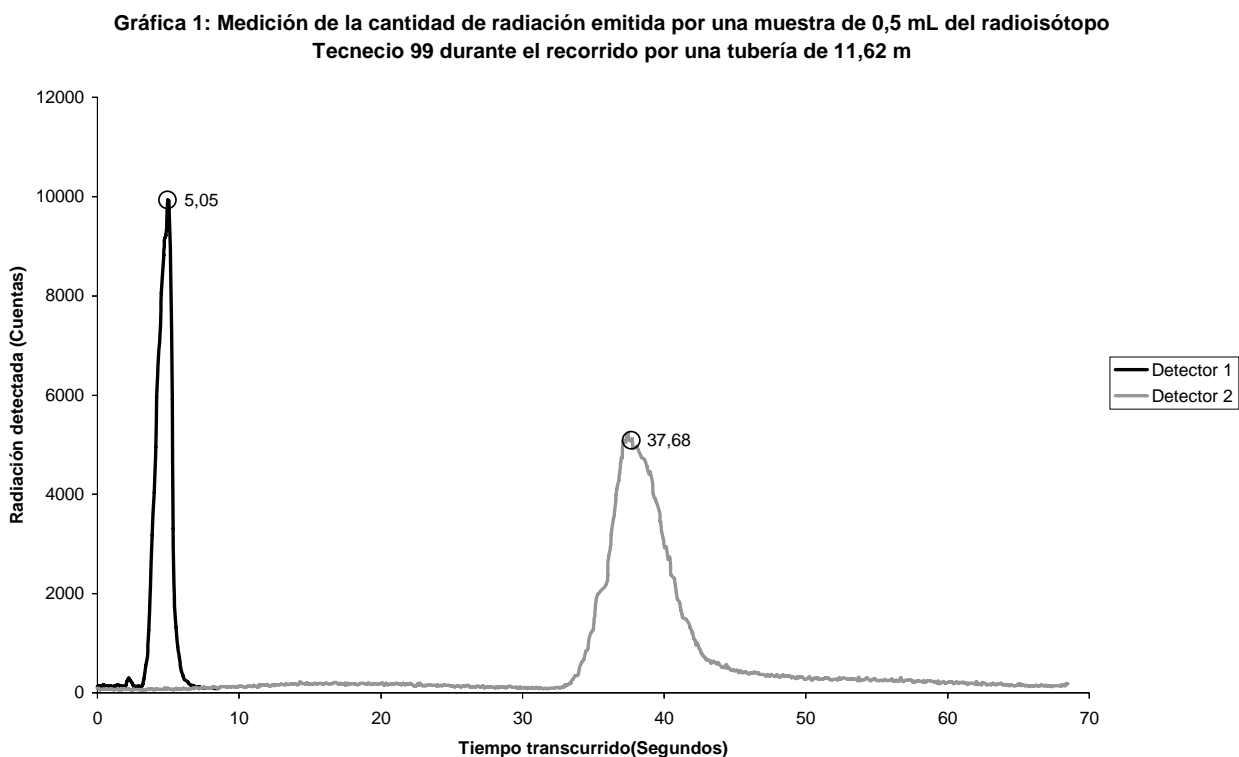
Total de muestra: 1 mL

Cantidad inyectada 0.5 mL

Distancia del trayecto total: 11.62 m.

El valor de la radiación de fondo obtenida mediante el equipo fue de 33.5 C/s.

Los datos obtenidos al aplicar el ensayo se detallan en la gráfica 1, obtenida a partir de los datos aportados por el equipo y el programa de software.



Dado el largo período en la vida media del Tecnecio 99m (8,02 horas), se puede despreciar la pérdida de actividad durante el tiempo transcurrido entre la calibración del radioisótopo y la inyección de este en el sistema. Así, se asegura que los resultados del ensayo son confiables en todo momento. La actividad del elemento radiactivo se confirma como apropiada al ver que la radiación percibida por el detector 1 al inyectar el isótopo es mucho mayor que la radiación de fondo, produciendo una elevación del conteo en la gráfica 1.

El flujo consistió en un circuito cerrado de agua, el cual era impulsado por una bomba.

En la gráfica 1, dada por el equipo contador, se muestran los puntos máximos detectados por cada uno de los detectores, que indican el momento donde se dio un conteo máximo de radiación cerca de cada uno de estos dispositivos. Así, sabiendo el tiempo exacto que tardó el trazador desde su inyección para llegar a estos puntos se puede tomar una diferencia para determinar cuál fue el tiempo requerido para que el flujo pasara por los puntos establecidos.

$$t = t_2 - t_1 = 37,68 - 5,05 = 32,63 s \quad (1)$$

Tomando este resultado se puede determinar cuál es la velocidad del flujo, dividiendo entre éste la distancia recorrida por el flujo entre cada uno de los detectores:

$$v = \frac{d}{t} = \frac{11,62 m}{32,63 s} = 0,36 m/s \quad (2)$$

Se observa que el pico de la lectura del detector 1 es mucho más cerrado que el del detector 2 debido a que el primero mide una inyección instantánea, o sea, se registra el dato de radiación prácticamente en el momento de insertar el radioisótopo, mientras que el segundo toma el dato cuando el trazador se ha mezclado con el fluido, por lo que se dispersa en este y el detector lo percibe durante un mayor periodo, por lo que se toma el punto del gráfico donde se expresa una mayor radiación, interpretándose que es esta la mejor aproximación a la velocidad promedio del fluido.

Debido a las dificultades que se presentan al colocar muy cercanos los detectores, éstos fueron ubicados a una distancia de un metro de diferencia, con la condición de que el detector 1 se ubicó en un punto muy cercano al principio del circuito y el detector 2 cerca del final, por lo que se podría despreciar esta diferencia y se puede tomar la trayectoria total del flujo como la distancia entre cada uno de los dispositivos. Al usar esta técnica, se puede emplear este ensayo como una simulación de una aplicación a mayor escala.

4. Discusión

Hasta hace poco tiempo, a nivel nacional prácticamente no se conocía sobre el tema de los radiotrazadores y el escaneo gamma. Pero gracias a la iniciativa del Organismo Internacional de Energía Atómica de expandir el conocimiento de dichas tecnologías así como el equipo necesario para realizar dichas pruebas, nuestro país representado por nuestra institución se ha beneficiado al poder contar ahora con personal debidamente capacitado y con equipo de última generación.

Además de la promoción que ha brindado el organismo, es de recalcar la buena disponibilidad que han tenido las instancias administrativas del ITCR para favorecer las diferentes actividades que se han podido realizar en el marco de este proyecto. Gracias a esto, se ha podido colocar al ITCR como a uno de los principales promotores del uso pacífico de la energía nuclear, específicamente de las tecnologías de radiotrazadores y escaneo gamma. Lo anterior ha quedado plasmado en las actividades desarrolladas durante el proyecto, como lo es, la realización de diferentes experimentos en instituciones de gran importancia a nivel nacional, charlas brindadas a los encargados de dichas instituciones y experimentos desarrollados en nuestra institución. En este último apartado sobresale el hecho de implementar tanto la teoría como la realización de prácticas de campo, en cursos impartidos por la Escuela en lo referente a técnicas de control no destructivo y relacionadas con el tema de radiotrazadores y perfilaje gamma. Todo lo anterior significa que se ha conseguido un importante traslado de conocimiento hacia los futuros profesionales que se van egresando de nuestra institución.

Ha sido de mucha importancia también la experiencia adquirida por el grupo de trabajo gracias a las visitas de experto y gracias a las diferentes experiencias que se han realizado a cargo de estos especialistas. Esta ha sido otra forma de transferir conocimiento y complementar los conocimientos teóricos obtenidos en cursos fuera del país y el proporcionado a través de material didáctico adquirido en ellos.

Con el desarrollo del proyecto, se ha puesto de manifiesto que existe un muy buen nivel de preparación por parte del personal vinculado al proyecto y existe una excelente disposición por parte de las diferentes autoridades para seguir aportando su ayuda al desarrollo de las ya mencionadas tecnologías pero, sería bueno mencionar también que es necesario poder contar con algunas herramientas adicionales que puedan facilitar aún más dichas actividades. Algunas de ellas son:

- Poder contar con mayor autonomía para producir material radiactivo y poder obtener nuestro propio radiotrazador para la realización de diferentes prácticas y estudios.
- Planear una mayor cantidad de experiencias en empresas que eventualmente pudieran aplicar estas técnicas de control de sus respectivos procesos industriales.
- En los procesos de perfilaje es necesario contar con un mejor sistema de manipulación a distancia que provea de mayor exactitud en las mediciones
- Poder seguir contando con tiempo dentro de la carga académica para la realización de mayor cantidad de proyectos de investigación en el área de la tecnología nuclear.

5. Conclusiones

- Se han abierto los espacios necesarios para la realización de practicas de campo en empresas reconocidas a nivel nacional, obteniéndose resultados satisfactorios.
- Se requiere un incremento en las visitas a empresas que potencialmente puedan emplear estas tecnologías, ya sea para ofrecer charlas informativas así como realización de practicas de campo
- Se han podido corregir algunos aspectos de procedimiento de las diferentes técnicas gracias al aporte hecho por los expertos que han visitado nuestra escuela.
- Se han desarrollado protocolos o procedimientos para la realización de las diferentes actividades de radiotrazadores y perfilaje los cuales contemplan aspectos como seguridad, responsables, transporte, disposición de desechos, entre otros.
- Se han podido introducir los dos temas en cuestión en los cursos de la escuela lo que fomenta la transferencia hacia nuestros estudiantes y los de otras carreras.
- Para poder tener mayor autonomía para la adquisición de material radiactivo para emplearlo en prácticas de radiotrazadores es necesario contar con un generador de algún radioisótopo.
- Para le mejora en la captura de datos y su posterior análisis en forma precisa es necesario contar con un nuevo sistema de manipulación a distancia tanto para la fuente como para el detector, en las pruebas con perfilaje gamma.

6. Agradecimientos

- A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, por haber sido facilitador y propulsor de la investigación en nuestro Proyecto, lo que ha quedado demostrado en la dotación de tiempos para los investigadores involucrados y disponibilidad de recursos económicos
- Al Organismo Internacional de Energía Atómica el cual, a través de la Comisión Nacional de Energía Atómica, ha donado equipamiento y capacitación para la puesta en marcha de las dos técnicas en cuestión (fuentes isotópicas, detectores de radiación, sistema de estudio de procesos industriales por circuito cerrado, software, expertos internacionales, entre otros)
- A la Refinería Costarricense de Petróleo (RECOPE) y al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), por disponer de sus instalaciones para la realización de pruebas con los métodos de perfilaje gamma y radiotrazadores

7. Bibliografía

- IAEA (1998) **Practical Guidebook for Radioisotope-based Technology in Industry**. Vienna.
- Johansen and Jackson (2004) **Radioisotope Gauges for Industrial Process Measurements**. John Wiley and sons Ltd. England.
- Maggio y otros (2000) **Aplicaciones Industriales de Radiotrazadores y Fuentes selladas de Radiación**. IAEA, Vienna.

8. Apéndices

Apéndice I

Procedimiento para prácticas seguras con radiotrazadores

Procedimiento

El procedimiento para prácticas seguras con radiotrazadores se divide en cinco componentes:

1. Diseño de la práctica con radiotrazadores
2. Selección, obtención y preparación del radiotrazador
3. Selección de las áreas controladas
4. Inyección del radiotrazador
5. Mantenimiento del equipo

1. DISEÑO DE LA PRÁCTICA CON RADIOTRAZADORES

PREVIO A LA REALIZACIÓN DE UNA PRÁCTICA CON RADIOTRAZADORES ES FUNDAMENTAL HABER CONCLUIDO LOS SIGUIENTES REQUERIMIENTOS DE DISEÑO PARA RADIOTRAZADORES:

- a) Haber determinado que, por consideraciones económicas, sociales, ambientales y otras, la tecnología de radiotrazadores debe ser utilizada en este caso particular, ofreciendo las justificaciones correspondientes
- b) Haber seleccionado adecuadamente la técnica a utilizar, lo cual requiere como condición previa el haber entendido apropiadamente el problema a resolver
- c) Haber seleccionado apropiadamente el radiotrazador así como la composición química a utilizar
- d) Haber seleccionado el modo de inyección del radiotrazador a utilizar, ya sea de manera instantánea o continuamente, los puntos de inyección, así como los puntos de medición a utilizar
- e) Haber determinado el tipo de medición a realizar, es decir, si se trata del análisis de muestras o de manera continua (on-line)
- f) La técnica de adquisición de datos a utilizar
- g) Las técnicas de evaluación a utilizar
- h) Evaluación y optimización de las actividades de manera que se realicen de la manera más adecuada, lo cual supone una adecuada comprensión del proceso a investigar
- i) Es importante establecer el flujo adecuado de ejecución de cada una de las actividades que conlleva la realización de la práctica

2. SELECCIÓN, OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DEL RADIOTRAZADOR

- a) La selección del radiotrazador debe derivar de una comprensión adecuada del problema a resolver

- b) Para su selección es fundamental tomar en consideración las características del mismo: actividad, energías, capacidad de detección, tiempos requeridos entre la obtención del radiotrazador y la evaluación, entre otros
- c) Determinar si su obtención es por activación o por generación
- d) Determinar si se trata de un radiotrazador líquido, gaseoso o sólido
- e) Tanto durante la obtención como en la preparación del radiotrazador se deben utilizar las siguientes medidas de seguridad:
 - Tanto la obtención como la preparación del radiotrazador debe realizarse en un área restringida
 - Se debe utilizar siempre el instrumental para la detección de tasa de dosis y el dosímetro personal correspondiente
 - Colocar en el mueble utilizado con ese propósito toallas absorbentes de manera que se garantice que no quedarán residuos del isótopo en el mueble
 - Utilizar guantes para evitar el contacto directo con el material durante la manipulación
- f) Dependiendo de las características del radiotrazador se deben utilizar mascarillas para evitar la ingestión o inhalación accidental del material radiactivo
- g) Una vez terminado el proceso, se debe disponer en un lugar temporal adecuado, los guantes y la toalla
- h) Determine el detector de tasas de dosis para asegurarse de que no queda material radiactivo en el mueble utilizado
- i) En todo momento el radiotrazador debe permanecer en el contenedor diseñado para ese propósito

3. Preparación de las áreas

Tanto en los puntos de inyección como de medición deben adoptarse las medidas de seguridad correspondientes a áreas controladas y los blindajes correspondientes, de manera que se tenga control de que se eviten las exposiciones innecesarias tanto de los trabajadores como del público en general.

4. Inyección del radiotrazador

- a) Al igual que para la preparación del radiotrazador, deben utilizarse toallas o materiales absorbentes desechables de manera que se garantice que no habrá derrames en el sitio del trabajo
- b) Deben utilizarse los implementos requeridos: guantes, mascarillas para evitar el contacto directo con la piel, la ingestión o la inhalación del material radiactivo
- c) Todo personal involucrado debe contar y portar los dosímetros personales, así como los detectores de tasa de dosis a fin de garantizar que la práctica se realiza de manera segura
- d) Si la técnica involucra la toma de muestras, se deben utilizar estos mismos implementos para evitar derrames y el contacto directo con el material radiactivo. Medidas similares deben adoptarse al momento de analizar las muestras

5. MANTENIMIENTO Y ALMACENAMIENTO DEL EQUIPO

El equipo utilizado para la inyección del radiotrazador y para la toma de muestras debe ser limpiado adecuadamente según la especificación del fabricante. De igual manera, debe realizarse el mantenimiento requerido, según especificación del fabricante. El equipo de mantenerse en las condiciones ambientales indicadas por el fabricante.

Apéndice II

Procedimiento para práctica seguras en perfilaje gamma

Procedimiento

El procedimiento para prácticas seguras en perfilaje gammal se divide en cinco componentes:

1. Preparación previa de la prueba
2. Registro de mantenimiento del equipo de perfilaje gamma
3. Desplazamiento del equipo al lugar de la práctica
4. Desarrollo de la práctica
5. Regreso del equipo

1. PREPARACIÓN PREVIA DE LA PRUEBA

El planeamiento de la prueba es fundamental para garantizar el éxito del perfilaje. Para ello es fundamental realizar los siguientes pasos:

- a) Analizar las características del tanque, columna de destilación o de cualquier otro objeto al que se aplique este tipo de tecnología
- b) Determine si hay problemas para la ubicación de la fuente, el detector y el sistema de registro de datos
- c) Una vez que se considere que la prueba puede realizar sin problema, determine el tipo de arreglo correspondiente al tipo de objeto a perfilar. Es decir, si se trata de un arreglo de una pasada (single-pass tray), o de dos pasadas (Double-pass tray) o del sistema de enrejado (Grid scanning)
- d) Para cada arreglo determine el número de segmentos en los que se dividirá el proceso de perfilaje
- e) Calcule con lápiz y papel la dosis de radiación dispersada y la radiación recibida en el punto en el que se ubicarían los operarios. En todo caso debe justificarse el no uso de colimadores
- f) Defina el sistema de desplazamiento de la fuente y del detector, así como la ubicación de los operarios durante la prueba, tomando en consideración que dicha ubicación corresponda sea la óptima que permita trabajar adecuadamente y a la vez reducir al mínimo la dosis de radiación durante la prueba.

- g) Asegúrese que se cuenta con todos los dispositivos requeridos para la prueba, en caso contrario, planifique la obtención de aquellos que faltan.
- h) Determine el tipo de mecanismo de protección radiológica, en caso de desprendimiento del equipo o cualquier otra circunstancia que puede presentarse durante la prueba
- i) Establezca un estimado del tiempo requerido para la prueba
- j) Determine el área controlada y puntos de delimitación

2. Registro de mantenimiento del equipo de perfilaje gamma

Las actividades de mantenimiento son fundamentales para garantizar un uso óptimo del equipo y evitar la exposición innecesaria del personal a la radiación gamma.

Para esto es fundamental lo siguiente:

- a) Determine que el bulto que contiene la fuente gamma se encuentre en buena condición, sin golpes ni fisuras y que la radiación a un metro y a contacto se encuentre dentro de los límites establecidos por el fabricante.
- b) Determine que el detector se encuentre funcionando adecuadamente y que haya recibido el mantenimiento (limpieza de superficies, que no haya humedad, acumulación de polvo y cualquier otro tipo de partículas)
- c) Que el sistema de captura de datos funcione de manera adecuada.

Cualquier imperfecto debe ser reportado al responsable de área.

2.1. Actividades de mantenimiento del equipo auxiliar

- a) Inspeccione que los cables, tanto los que conectan el detector al sistema de captura de datos no tengan ningún daño físico
- b) Debe llevarse un registro del mantenimiento y de la condición del equipo

3. DESPLAZAMIENTO DE FUENTES ISOTÓPICAS AL LUGAR DE LA PRÁCTICA

3.1. SALIDA DEL EQUIPO

- a) Antes de la salida del equipo, chequee que se le haya dado al equipo el mantenimiento apropiado. Bajo ninguna circunstancia debe sacarse el equipo si no ha recibido el mantenimiento apropiado. Utilice el procedimiento descrito en 9.2 para este efecto
- b) El equipo pueden ser desplazado del lugar de almacenamiento únicamente cuando esté listo para ser utilizado
- c) Las fuentes sólo deben ser movidas en bultos diseñados para el transporte de materiales radiactivos y del tipo apropiado. Los contenedores deben estar propiamente cerrados y con sus llaves sin colocar.
- d) Debe asegurarse de cumplir con los requisitos nacionales establecidos para el desplazamiento de equipos de radiaciones fuera del emplazamiento.

3.2. CARACTERÍSTICAS Y PREPARACIÓN DEL VEHÍCULO

El transporte de fuentes y equipos auxiliar para perfilaje gamma debe realizarse de acuerdo con el procedimiento de transporte (Pr-008: “PROCEDIMIENTO PARA TRANSPORTE SEGURO DE EQUIPOS Y MATERIALES RADIATIVOS”)

4. Desarrollo de la práctica

- a) Previo al desarrollo de la práctica, los operarios deben tener claridad sobre el tipo de arreglo a realizar, el número de desplazamientos de la fuente-detector requeridos para obtener los mejores resultados. Igualmente, es fundamental que, en aquellos casos en los que se requiere la construcción de un montaje para el desplazamiento de la fuente-detector, y dependiendo de la complejidad del mismo, debe realizarse previo a la salida del equipo. En aquellos casos en los que la realización de la prueba requiere montaje simple, este deben hacerse manteniendo el equipo en el vehículo y en el bulto de transporte. El equipo debe sacarse del vehículo únicamente cuando todos los detalles de la prueba hayan sido completamente implementados.
- b) Especial atención debe prestarse a la determinación del área controlada y de la señalización. Así también, la información que debe proporcionarse a fin de que personas ajenas a los que están realizando la prueba no ingresen al área.
- c) Para aquellos arreglos de doble pasada o del sistema de enrejado el cambio de disposición fuente-detector debe garantizarse que se está reduciendo al máximo el tiempo de exposición de los operarios. En aquellos casos en los que se considere que el desmontaje del equipo es necesario, debe hacerse.

4.1. Montaje y desplazamiento del equipo

- a) En la medida de lo posible el desplazamiento de la fuente detector debe hacerse desde cierta distancia, de manera que el trabajador reciban la menor dosis de radiación posible. En aquellos casos en los que esto último no es factible, debe garantizarse que los tiempos requeridos durante cada uno de los desplazamientos sea tan pequeño como sea posible
- b) En aquellos casos en los que se quiera tener un perfil para cada uno de los arreglos, si esto fuera necesario, la fuente debe mantenerse en la parte más alta de la columna, del tanque o del objeto a inspección, de manera que se reduzca al mínimo la exposición a la radiación

4.2. Atención de emergencias durante la práctica

Durante la realización de la práctica se debe estar vigilante de lo que ocurre en el área controlada de manera que se puedan tomar las medidas necesarias en caso de un incidente o emergencia. Dos situaciones son particularmente importantes de considerar:

- a) El desprendimiento accidental de la fuente sellada. En este caso, debe ubicarse la fuente en un lugar seguro mientras que corrije el problema
- b) Ingreso de personas no autorizadas. En este caso, es necesario que se eleve la fuente, y asegurarse que las personas ajenas se alejen del área controlada

4.3. Después de la realización de la práctica

Después de realizada la práctica,

- a) Retire la fuente sellada y el equipo auxiliar.
- b) Coloque el equipo en el bulto de transporte

5. Regreso del equipo

- a) Utilice los procedimientos de seguridad para devolver la fuente
- b) Si se utilice un vehículo, éste debe exhibir rótulos de advertencia y el contenedor debe mantenerse alejado de los ocupantes
- c) Limpie el equipo antes de alojarlo en el depósito
- d) Deje constancia en el libro de registros de la devolución del equipo y su condición
- e) Vuelva a depositar la lleve un lugar seguro y asegúrese de que el lugar donde está la fuente se mantenga cerrado de manera apropiada